

P13-2016-65

А. А. Марачев¹, Ю. Н. Пепельшев², А. К. Попов²,
Д. Сумхуу^{2,3,*}

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2М**
ПРИ СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОМ
АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛЯТОРЕ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

¹ Московский институт открытого образования, Москва

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

* E-mail: dsumkhuu@jinr.ru

Марачев А. А. и др.

P13-2016-65

Анализ динамики импульсного реактора ИБР-2М
при статистически оптимальном автоматическом регуляторе

Для импульсного реактора ИБР-2М, отличающегося высоким уровнем флуктуаций реактивности и, как следствие, амплитуд импульсов мощности, рассмотрены два варианта автоматического регулятора (АР). Оба варианта удовлетворяют критерию минимума вероятного среднеквадратического отклонения амплитуды будущего импульса на основании информации, полученной в уже прошедших импульсах. Отличие вариантов АР состоит в учете информации. Поскольку возмущения реактивности в процессе работы реактора содержат как случайные, так и регулярные составляющие, для обоих вариантов АР рассмотрены переходные процессы мощности при этих видах возмущений реактивности. Показано, что принятый на ИБР-2М вариант АР, при котором более ранней информации придается меньший вес, является более предпочтительным, чем вариант, когда информации, полученной из фиксированного количества последних импульсов, придается наибольший вес, а более ранняя информация не учитывается вообще.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2016

Marachev A. A. et al.

P13-2016-65

Analysis of Dynamics of the IBR-2M Reactor
with Statistically Optimal Automatic Regulator

For the IBR-2M pulsed reactor, characterized by a high level of reactivity fluctuations and, as a consequence, of a power pulse amplitude, two variants of an automatic regulator (AR) are considered. Both variants satisfy the criterion of a minimum probable standard deviation of the amplitude of the future pulse on the basis of information obtained in the previous momenta. The difference between the AR variants is registered in the data. Since perturbations of reactivity in the process of reactor operation contain random and regular components, transient processes in these types of reactivity are considered for both AR variants. It is shown that the variant of AR accepted in the IBR-2M, where earlier data is given less weight, is more preferable than the variant where the information obtained from a fixed number of the last pulses is given the greatest weight, and the earlier information is not considered at all.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2016

ВВЕДЕНИЕ

В импульсном реакторе на быстрых нейтронах ИБР-2М, являющемся модернизированным вариантом реактора ИБР-2, создаются периодические узкие импульсы реактивности большой амплитуды (2,6 %) с периодом 0,2 с. Это достигается благодаря вращению вблизи активной зоны подвижного отражателя. Органы управления вводятся в такое положение, что в течение коротких интервалов времени (~ 450 мкс) в окрестностях максимумов импульсов реактивности реактор становится *надкритическим на мгновенных нейтронах*, оставаясь глубоко подкритическим в интервалах между импульсами. В результате с периодом 0,2 с реактор генерирует мощные нейтронные импульсы (импульсы мощности) шириной 200 мкс на половине высоты. Мощность фона (мощность между импульсами) почти на четыре порядка меньше амплитуды импульсов мощности. Подавляющая часть (92 %) всей энергии, выделяемой за период, выделяется в импульсе мощности, а между импульсами выделяется лишь 8 % (энергия фона). В связи с этим для упрощения анализа динамики реактора принято, что мощность фона выделяется не непрерывно между импульсами, а в виде импульса, совмещенного с импульсом мощности. В результате импульсный реактор представлен как сугубо импульсная система и его динамика описана дискретными уравнениями. В них использованы решетчатые функции, содержащие лишь значения переменных в дискретные моменты времени — моменты максимумов импульсов мощности [1, 2].

Импульсный реактор несравненно более чувствителен к изменениям реактивности, чем стационарный реактор. Это хорошо прослеживается по уравнениям кинетики импульсного реактора, записанным для переменных, усредненных по периоду импульсов мощности. Эти уравнения имеют тот же вид, что и уравнения стационарного реактора, но с заменой эффективной доли запаздывающих нейтронов β так называемой импульсной долей запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{и}}$ [3]. Поскольку для ИБР-2М $\beta_{\text{и}} = 1,54 \cdot 10^{-4}$, а $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$, чувствительность ИБР-2М к изменению реактивности в импульсном режиме более чем на порядок выше, чем в случае, если бы он работал в режиме непрерывного выделения мощности.

Вследствие особенностей конструкции реактору ИБР-2М присущи существенные флуктуации реактивности, которые в связи с периодическим выхо-

дом в надкритическое состояние вызывают еще более существенные флуктуации амплитуд импульсов мощности.

Регулируемым параметром реактора является относительное отклонение амплитуды импульса мощности. Оно равно относительному отклонению энергии импульса мощности $\Delta e_n = (E_n - E_n^0)/E_n^0$, где E_n и E_n^0 — энергия импульса и его базовое (среднее) значение соответственно. При анализе динамики реактора удобнее пользоваться относительным отклонением энергии импульса мощности, поэтому именно оно принято в качестве регулируемого параметра.

При анализе режима стабилизации мощности реактивность удобнее выражать в долях β_n . В этом режиме численные значения возмущений реактивности Δr , выраженные в долях β_n , и численные значения относительных отклонений энергии импульсов мощности Δe_n , вызванных этими возмущениями реактивности, очень близки, а для диапазонов $-0,1 \leq \Delta r \leq 0,1$ и $-0,1 \leq \Delta e_n \leq 0,1$ практически совпадают [4].

Флуктуации регулируемого параметра относительно среднего уровня в штатном режиме стабилизации обычно укладываются в диапазон $\pm 20\%$ с возможными выбросами до 40% , что близко к границам срабатывания аварийной защиты ($\pm 50\%$). Учитывая это, к автоматическому регулятору (АР) предъявляются особые, причем противоречивые, требования. С одной стороны, он должен обеспечивать традиционные показатели качества переходных процессов при регулярных возмущениях реактивности (малое перерегулирование и малое время регулирования при скачке реактивности). С другой стороны, АР должен удовлетворять некоему критерию качества при случайных возмущениях реактивности.

СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ И СТРУКТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

В качестве статистически оптимального принят алгоритм АР, обеспечивающий в режиме стабилизации *минимум вероятного* среднеквадратического относительного отклонения энергии будущего (n -го) импульса мощности на основании информации, полученной из предшествующих (k -х) импульсов мощности ($k < n$). При этом информации от предшествующих импульсов придается разный вес, и тем самым вводится принцип старения информации. В результате статистически оптимальный алгоритм АР приобретает следующий вид [5]:

$$\Delta r_{An} = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2} \sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2 (\Delta r_{Ak} - \Delta e_{ik}), \quad (1)$$

где Δr_{An} , Δr_{Ak} — выраженные в долях $\beta_{и}$ отклонения реактивности АР от среднего (базового) уровня, относящиеся к будущему (n -му) и предшествующим (k -м) импульсам мощности соответственно; $\Delta e_{ик}$ — относительные отклонения энергии предшествующих импульсов мощности ($k = 0$ соответствует началу отсчета — началу набора автоматическим регулятором информации); $a_{n-k}^2 \leq 1$ — параметр, зависящий от разности номеров импульсов $n - k \geq 1$, характеризует степень старения информации, полученной из предшествующих импульсов мощности.

Подробный вывод статистически оптимального алгоритма приведен в работе [6], причем как для режима стабилизации, так и для других возможных режимов работы реактора.

Формула (1) для импульсной системы, являющаяся аналогом интеграла Дюамеля для непрерывной системы, связывает выходной сигнал АР Δr_{An} в будущем (n -м) импульсе со значениями входного сигнала АР ($\Delta r_{Ak} - \Delta e_{ик}$), соответствующими предшествующим (уже прошедшим) импульсам с номерами $k = 0, 1, \dots, n-1$, и с дискретными значениями импульсной переходной характеристики АР $w_{An-k} = \left(1 / \sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2\right) a_{n-k}^2$. Из формулы (1) следует, что импульсная переходная характеристика АР, т. е. реакция АР на единичный импульс (импульс единичной площади), подаваемый на АР в момент, соответствующий импульсу с номером $m = 0$, описывается выражением

$$w_{An} = \left(1 / \sum_{m=1}^n a_m^2\right) \sum_{m=1}^n a_m^2, \quad (2)$$

где $n \geq 1$.

Таким образом, импульсная переходная характеристика и, следовательно, структура АР определяются выбором функции a_{n-k}^2 в формуле (1). Наиболее естественными представляются два варианта выбора этой функции. Первый — когда более ранней информации придается меньший вес, иначе говоря, когда с ростом индекса $n - k$ параметр a_{n-k}^2 уменьшается ($a_0^2 = 1 > a_1^2 > a_2^2 > \dots$). Второй — когда информации, полученной в N предшествующих импульсов, придается наибольший вес, а информация, полученная в более ранних импульсах, считается недостоверной и не учитывается ($a_{n-k}^2 = 1$ при $1 \leq n - k \leq N$ и $a_{n-k}^2 = 0$ при $n - k > N$). В работе рассматриваются оба варианта.

Первый вариант. Функция a_{n-k}^2 описывается убывающей экспонентой:

$$a_{n-k}^2 = \exp[-(n - k)T_{и}/T_A], \quad (3)$$

где $T_{и}$ — период импульсов мощности; T_A — постоянная времени экспоненциальной функции a_{n-k}^2 .

Из формулы (3) следует, что начиная уже с номера импульса $n > 5T_A/T_u$ сумму $\sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2$ в алгоритме (1) можно считать постоянной величиной. Учитывая это, импульсная переходная характеристика АР (2) для ИБР-2М приобретает следующий вид:

$$w_{An} = (1 - e^{-T_u/T_A}) \sum_{m=1}^n e^{-mT_u/T_A}. \quad (4)$$

Это импульсная переходная характеристика аperiodического звена с импульсной передаточной функцией

$$W_A^*(z) = \frac{\Delta r_A(z)}{\delta_A(z)} = (1 - e^{-T_u/T_A}) \frac{z^{-1}}{1 - e^{-T_u/T_A} z^{-1}}, \quad (5)$$

где $\Delta r_A(z)$ и $\delta_A(z)$ — z -изображения соответственно выходного и входного сигналов АР, рассматриваемых как решетчатые функции — функции, отличные от нуля лишь в дискретные моменты времени (в моменты появления импульсов мощности).

При соотношении $T_A \gg T_u$ импульсная передаточная функция АР (5) упрощается, принимая вид импульсной передаточной функции интегратора:

$$W_A^*(z) = \frac{\Delta r_A(z)}{\delta_A(z)} = \frac{T_u}{T_A} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (6)$$

АР ИБР-2М представляет собой именно такой интегратор. Значение T_A может устанавливаться различным, для чего используется соотношение $T_A = 10\Delta$, где Δ — варьируемый параметр. В настоящее время принято $\Delta = 0,2$, т.е. $T_A = 2$ и коэффициент передачи АР в формуле (6) равен $T_u/T_A = 0,1$. Варьируемый параметр Δ — параметр скорости АР: чем он больше, тем меньше скорость АР при одном и том же сигнале на его входе.

Из соображений еще большего ослабления влияния шумов на работу АР регулируемый параметр Δe_{in} пропускается через дополнительно введенный фильтр и превращается в сглаженный сигнал $\Delta \tilde{e}_{in}$. В итоге на вход АР подается не сигнал $\delta_{An} = -\Delta e_{in}$, а сглаженный сигнал $\delta_{An} = -\Delta \tilde{e}_{in}$. Алгоритм сглаживания фильтра удовлетворяет статистически оптимальному критерию, аналогичному критерию оптимальности АР [7], и выражается формулой

$$\Delta \tilde{e}_{in} = \Delta \tilde{e}_{in-1} + \frac{1}{q} (\Delta e_{in} - \Delta \tilde{e}_{in-1}), \quad (7)$$

где $q > 1$ — коэффициент сглаживания (при $q = 1$ $\Delta \tilde{e}_{in} = \Delta e_{in}$, т.е. фильтр не работает и сглаживания регулируемого параметра не проводится).

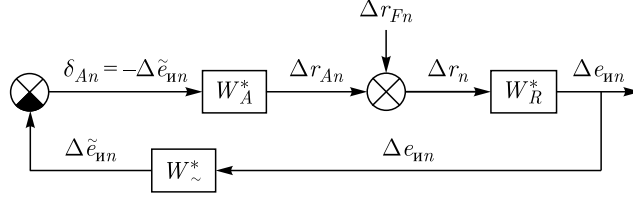


Рис. 1. Замкнутая система регулирования реактора ИБР-2М: W_A^* , W_R^* , W_{\sim}^* — импульсные передаточные функции АР, реактора и фильтра соответственно; Δr_F — внешнее возмущение реактивности

Фильтру с алгоритмом (7) соответствует импульсная передаточная функция

$$W_{\sim}^*(z) = \frac{\Delta \tilde{e}_n(z)}{\Delta e_n(z)} = \frac{1}{\frac{q-1}{q} - z^{-1}}. \quad (8)$$

Структурная схема замкнутой системы автоматического регулирования реактора ИБР-2М показана на рис. 1.

Второй вариант. Учитывается только информация, полученная из N предшествующих импульсов мощности, и ей придается наибольший вес ($a_{n-k}^2 = 1$ при $1 \leq n-k \leq N$ и $a_{n-k}^2 = 0$ при $n-k > N$). Этому случаю соответствует статистически оптимальный алгоритм АР

$$\Delta r_{An} = \frac{\sum_{k=1}^N (\Delta r_{An-k} - \Delta e_{in-k})}{N}. \quad (9)$$

Таким образом, выходной сигнал АР представляет собой среднеарифметическое значение N предшествующих входных сигналов. Из формулы (9) следует, что импульсная передаточная функция АР равна

$$W_A^*(z) = \frac{\Delta r_A(z)}{\delta_A(z)} = \frac{z^{-1}}{N} \frac{z^{-N}}{1-z^{-1}}. \quad (10)$$

Второму варианту соответствует структурная схема, показанная на рис. 1, но при $W_{\sim}^* = 1$, т. е. схема без фильтра.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРЕ ДЛЯ ДВУХ ВАРИАНТОВ АР

Моделирование процессов проведено в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 1. Поскольку динамика реактора существенно зависит от параметров обратной связи, обусловленной разогревом реактора,

до моделирования были оценены значения этих параметров. Оценка осуществлена посредством математической обработки зарегистрированных переходных процессов мощности, обусловленных преднамеренными прямоугольными колебаниями реактивности, в режиме саморегулирования [8].

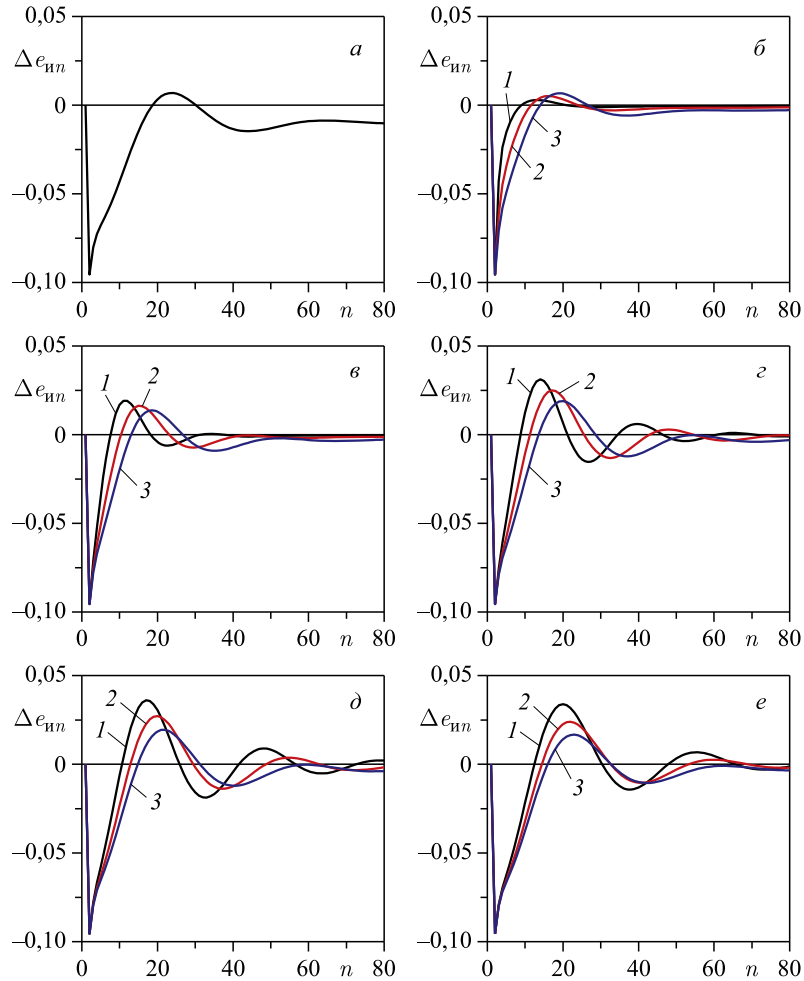


Рис. 2. Относительное отклонение энергии импульсов мощности $\Delta e_{ин}$ при скачке реактивности (в долях β_n) $\Delta r_F = -0,1$; n — номер импульса мощности: а) АР отключен (режим саморегулирования); б–е) первый вариант АР: параметр фильтра $q = 1$ (фильтр отключен) (б), $q = 4$ (в), $q = 8$ (г), $q = 16$ (д), $q = 32$ (е); 1 — параметр скорости АР $\Delta = 0,05$; 2 — $\Delta = 0,1$; 3 — $\Delta = 0,2$

Для обоих вариантов АР вычислены переходные процессы мощности при различных возмущениях реактивности, а именно: а) регулярное возмущение в виде скачка $\Delta r_F = -0,1$; б) реальный шум реактивности, вычисленный реактиметром [9] по зарегистрированному шуму мощности при работе реактора в режиме саморегулирования при номинальной средней мощности 2 МВт; в) случайное возмущение в виде белого шума с дисперсией $\sigma_F^2 = 0,05^2$. Также вычислены частотные характеристики для оценки устойчивости реактора.

Приведенные ниже рисунки иллюстрируют результаты расчетов для номинальных значений средней мощности 2 МВт и расхода теплоносителя (натрия) 100 м³/ч.

На рис. 2 для первого варианта АР показаны переходные процессы, вызванные скачком реактивности при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра q и параметра скорости АР Δ . Там же для сравнения показаны аналогичные переходные процессы для режима саморегулирования, т. е. без АР.

На рис. 3 показаны аналогичные процессы для второго варианта АР в зависимости от числа N предыдущих импульсов мощности, по которым путем усреднения входных сигналов АР формируется его выходной сигнал.

На рис. 4 показано среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности σ , обусловленное шумом реактивности, при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра q и параметра скорости АР Δ (первый вариант АР) и при разных значениях параметра N (второй вариант АР).

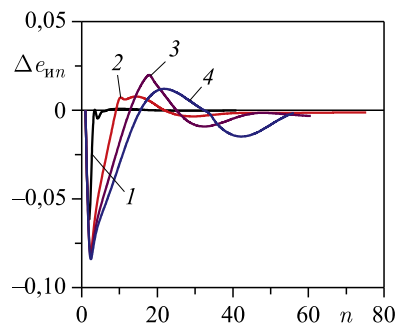


Рис. 3. Относительное отклонение энергии импульсов мощности Δe_{in} при скачке реактивности $\Delta r_F = -0,1$; n — номер импульса мощности; 1 — параметр АР $N = 1$; 2 — $N = 8$; 3 — $N = 16$; 4 — $N = 32$

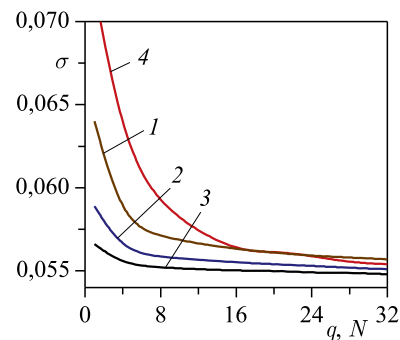


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности σ как функция параметра фильтра q (первый вариант АР, кривые 1–3) и параметра АР N (второй вариант АР, кривая 4): 1 — $\Delta = 0,05$; 2 — $\Delta = 0,1$; 3 — $\Delta = 0,2$

Кривые на рис. 4 рассчитаны для реального шума реактивности. Кривые, рассчитанные для возмущения реактивности в виде белого шума, не отличаются существенно от кривых, показанных на рис. 4.

На рис. 5 и 6 приведены амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы, используемые для суждения об устойчивости замкнутой системы «регулятор–реактор» по критерию Найквиста. Эти АФЧХ вычислены по импульсным частотным передаточным функциям $W_{\text{раз}}^*(j\bar{\omega}) = W_A^*(j\bar{\omega})W_R^*(j\bar{\omega})W_{\sim}^*(j\bar{\omega})$ для первого варианта АР и $W_{\text{раз}}^*(j\bar{\omega}) = W_A^*(j\bar{\omega})W_R^*(j\bar{\omega})$ для второго. Функции $W_A^*(j\bar{\omega})$, $W_R^*(j\bar{\omega})$ и $W_{\sim}^*(j\bar{\omega})$ получаются из функций $W_A^*(z)$, $W_R^*(z)$ и $W_{\sim}^*(z)$ путем замены аргумента

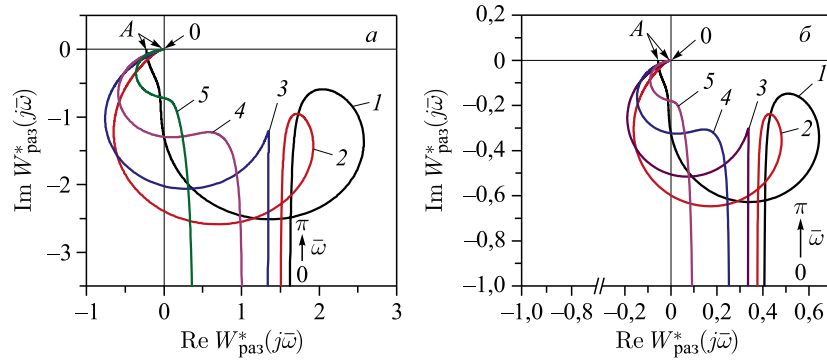


Рис. 5. Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы «регулятор–реактор» для значений параметра скорости АР $\Delta = 0,05$ (а) и $\Delta = 0,2$ (б) при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра: 1 — $q = 1$; 2 — $q = 4$; 3 — $q = 8$; 4 — $q = 16$; 5 — $q = 32$

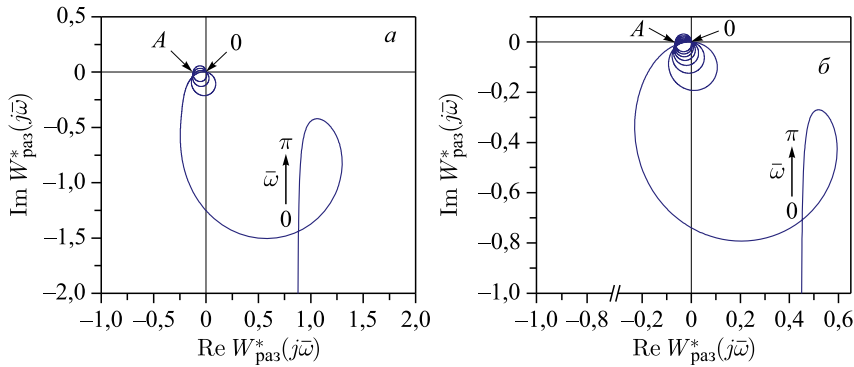


Рис. 6. Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы «регулятор–реактор» для второго варианта АР при $N = 8$ (а) и $N = 16$ (б)

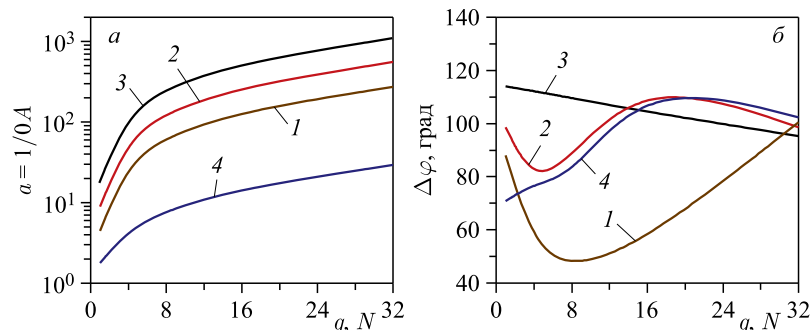


Рис. 7. Запасы по амплитуде (а) и фазе (б) для первого варианта АР: 1 — $\Delta = 0,05$; 2 — $\Delta = 0,1$; 3 — $\Delta = 0,2$; 4 — для второго варианта АР

$z = \exp(j\bar{\omega})$, где $\bar{\omega} = \omega T_n$ — безразмерная круговая частота (используется диапазон $0 \leq \bar{\omega} \leq \pi$), ω — круговая частота (с^{-1}), $j = \sqrt{-1}$.

Рис. 5 иллюстрирует для первого варианта АР влияние на АФЧХ коэффициента сглаживания фильтра q и параметра скорости АР Δ , а рис. 6 — влияние количества N усредняемых входных сигналов АР для второго варианта.

По АФЧХ, соответствующей тому или иному значению варьируемых параметров q и Δ для первого варианта или N для второго, определены запасы устойчивости по амплитуде $a = 1/0A$ и по фазе $\Delta\varphi$, равные наименьшему углу поворота вектора АФЧХ единичной длины до отрицательной действительной полуоси (см. рис. 5 и 6). На рис. 7 показаны зависимости запасов по амплитуде и фазе от варьируемых параметров q и Δ для первого варианта АР и от N для второго.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с существенным разбросом амплитуд импульсов мощности рассмотрены два варианта автоматического регулятора, удовлетворяющие критерию минимума вероятного среднеквадратического отклонения амплитуды будущего импульса мощности на основании информации, полученной в уже прошедших импульсах. Отличие вариантов — в выборе характера учета информации. Первый вариант характеризуется плавным старением информации: более ранней информации придается меньший вес. Второй вариант характеризуется скачкообразным видом старения информации: информации, полученной из фиксированного количества последних импульсов, придается наибольший вес, а более ранней — нулевой (т. е. более ранняя информация не учитывается вообще).

Возмущения реактивности содержат как случайные, так и регулярные составляющие. При случайном возмущении меньшее (хотя и не столь существенное) значение среднеквадратического отклонения регулируемого параметра получается при первом варианте АР. При регулярном возмущении в виде скачка реактивности несколько лучшие показатели переходного процесса мощности (перерегулирование и время регулирования) получаются при втором варианте АР. Однако для первого варианта запас устойчивости системы «регулятор–реактор» и по амплитуде, и по фазе больше, чем для второго, поэтому первый вариант представляется более предпочтительным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.
2. *Попов А. К.* Основы управления ядерным реактором: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 208 с.
3. *Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
4. *Попов А. К.* Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р3-95-463. Дубна, 1995.
5. *Попов А. К.* О статистически оптимальном регулировании энергии импульсов быстрого реактора // АЭ. 1971. Т. 31, вып. 3. С. 269.
6. *Popov A. K., Marachev A. A.* On Statistically Optimal Algorithms of Regulation of a Pulsed Reactor // Nuclear Waste Research: Siting, Technology and Treatment / Ed. A. P. Lattefer. New York: Nova Sci. Publ., Inc., 2008. P. 107–141.
7. *Marachev A. A., Pelyolyshev Yu. N., Popov A. K.* Statistically Optimal Filter for IBR-2 Mean Power Estimation // Ann. Nucl. Energy. 2008. V. 35. P. 1779–1784.
8. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.* Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности. Препринт ОИЯИ Р13-2016-17. Дубна, 2016.
9. *Марачев А. А. и др.* Реактиметр импульсного реактора периодического действия ИБР-2М // АЭ. 2014. Т. 117, вып. 5. С. 249–254.

Получено 11 октября 2016 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 08.12.2016.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 215 экз. Заказ № 58981.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/